

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 23220101153228

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于自适应差分进化算法的
多通道光纤光栅滤波器的优化设计

Optimal Design of Multichannel Fiber Bragg Grating Filters
Based on Self-Adaptive Differential Evolution Algorithm

陈 静

指导教师姓名: 刘 瞰 东 教 授

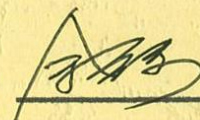
专 业 名 称: 控制理论与控制工程

论文提交日期: 2 0 1 3 年 月

论文答辩日期: 2 0 1 3 年 月

学位授予日期: 2 0 1 3 年 月

答辩委员会主席:



评 阅 人:



2013 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：陈静

2013年5月30日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

() 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

(☒) 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：陈静

2013 年 5 月 30 日

摘 要

光纤光栅具有体积小、低损耗、低成本、抗电磁干扰等特点，并且通过对光栅的设计，可以得到各种丰富的光谱特性，利用这一特性可构成许多性能独特的光纤无源器件。光纤光栅滤波器就是其中一种非常重要的光纤光栅器件，在光纤通信、光纤传感、光计算和光信息处理等领域均有着广阔的应用前景。随着不同的应用对波长通道数目需求的增长，对滤波器的性能提出了更加严格的要求，多通道光纤光栅滤波器的设计成为光滤波技术的研究热点和难点之一。

多通道光纤光栅的光谱要求有多个窄带通道，不同通道的中心波长不同，而且随着通道数目的增加，折射率调制深度也会递增，从而导致物理上不可实现。这些特点使多通道光纤光栅的设计比单通道的光纤光栅设计更加困难。在设计多通道光纤光栅滤波器时，不仅要使光谱满足预期的谱线特点，还要使尽可能的减少折射率调制深度，使其满足物理可实现。

本文针对多通道光纤光栅滤波器设计上存在的问题，在基于群时延的光纤光栅滤波器直接设计方法基础上，充分分析了群时延参数对折射率调制深度的影响。以最小化最大折射率调制深度为优化目标，建立群时延参数的优化模型，运用参数自适应的差分进化算法对优化模型进行求解，为多通道光纤光栅滤波器的每个子光栅分配合适的群时延参数，最终设计得到的多通道光纤光栅滤波器具有较低的折射率调制深度，使其在物理上可实现。

为验证所提出的设计方法的有效性，本文分别设计了 8 通道均匀滤波器、80 通道均匀滤波器、101 通道均匀滤波器以及 80 通道非均匀滤波器，并与现有的设计结果对比分析。实验表明由本文算法设计出的滤波器在折射率调制深度的衰减系数上明显优于现有的设计方法。

本文通过挖掘多通道光纤光栅滤波器现有设计中存在的可优化问题，采用进化算法优化技术进行跨领域研究，得到了较好的研究成果，本文的研究对于智能优化分析方法在光纤光栅器件研究领域的应用具有一定的参考价值。

关键词：光纤光栅；差分进化算法；多通道滤波器

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Fiber Bragg gratings (FBGs) have attracted considerable interest for modern optical communication systems owing to their advantageous properties such as low loss, small size, high reliability and compatibility with other fiber-type components. They can act as many various optical devices, such as narrowband filters, optical add-drop multiplexers, and dispersion compensators. Among them, multichannel fiber Bragg grating filter is of special importance. An FBG with a multichannel spectral response is highly desirable in fiber communications, sensor, optical calculation and optical information processing, to perform functions such as multi-wavelength filtering and multichannel chromatic dispersion management. Hence, the design of multichannel FBG filters has been an active research topic recently.

Compared with a single-channel grating, multichannel FBG device is extremely difficult to realize. With an increase in the number of channels, the maximum index modulation also increases. Therefore, the manufacture of a multichannel FBG filter requires a considerably high index modulation and the tremendous precision of the FBG writing tool. Since there is an upper limit on the index modulation, the maximum index modulation may not be physically realizable. Synthesize the multichannel grating should not only meet the given spectrum but also ensure a realizable maximum index modulation.

In order to reduce the index modulation of multichannel FBG filter, tailored group delay is introduced into the target reflection spectrum to design a multichannel FBG. The group delay parameter plays a significant role in the group delay based direct design method. Considering the influence of the group delay parameter, we establish an optimization model to minimize the maximum refractive index modulation. In the proposed method, self-adaptive differential evolution algorithm is utilized to get an appropriate group delay parameter for each channel. This leads to a further reduction in maximum index modulation to the physically realizable level.

For verification purposes, the proposed method is applied the synthesis of 8-channel, 80-channel, 101-channel uniformly spaced FBG filter and 80-channel non-uniformly spaced FBG filter. The simulation results show that the self-adaptive DE based method yields a higher maximum index modulation reduction factor, which is better than the previously reported results.

In this thesis, we present a specific optimization problem in the synthesis of multichannel FBG filter and utilize the evolutionary optimization technique to solve it. The study has certain theoretical value and practical meaning.

Keywords: fiber Bragg grating; differential evolution algorithm; multichannel filter.

目 录

摘 要.....	I
Abstract	III
第一章 绪论	1
1.1 光纤光栅的发展.....	1
1.2 光纤光栅滤波器简介	2
1.2.1 光纤光栅滤波器的分类.....	2
1.2.2 光纤光栅滤波器的应用	2
1.3 设计光纤光栅滤波器的研究现状	3
1.3.1 光纤光栅反问题的求解.....	3
1.3.2 多通道光纤光栅的设计方法	6
1.4 本文的主要工作及创新点	7
第二章 光纤光栅的基本理论	9
2.1 光纤光栅的工作原理	9
2.2 光纤光栅的理论分析方法	10
2.2.1 耦合模理论	10
2.2.2 传输矩阵法	13
2.3 本章小结	15
第三章 离散层析算法及其应用	16
3.1 离散层析算法.....	16
3.1.1 光纤光栅反问题	16
3.1.2 DLP 算法原理.....	17
3.2 DLP 算法重构多通道光纤光栅	20
3.2.1 多通道目标反射谱	20
3.2.2 加窗切趾方法	21
3.3 本章小结	23

第四章 自适应差分进化算法	24
4.1 差分进化算法概述	24
4.2 标准差分进化算法	24
4.3 参数自适应差分进化算法	29
4.3.1 控制参数的影响	29
4.3.2 jDE 算法原理	29
4.4 本章小结	32
第五章 多通道光纤光栅滤波器的优化设计	33
5.1 多通道光纤光栅滤波器设计存在的问题	33
5.2 基于群时延的光纤光栅滤波器直接设计方法	35
5.2.1 基本原理	35
5.2.2 参数设计	37
5.3 建立群时延参数的优化模型	41
5.3.1 群时延参数的影响	41
5.3.2 目标函数与约束条件	42
5.4 实验结果与讨论	45
5.4.1 仿真实验	45
5.4.2 结果分析	52
5.5 本章小结	54
第六章 总结与展望	55
[参考文献]	57
在学期间发表及完成的论文	63
致谢语	64

Contents

Abstract in Chinese.....	I
Abstract in English	III
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Development of fiber Bragg grating technology	1
1.2 Introduction of FBG filter	2
1.2.1 Classification of FBG filter.....	2
1.2.2 Applications of FBG filter	2
1.3 Research status of the synthesis of the FBG filter	3
1.3.1 Synthesis of FBG.....	3
1.3.2 Design of multichannel FBG filter.....	6
1.4 Main and innovation works in this thesis.....	7
Chapter 2 Fundamental Theory of Fiber Bragg Grating	9
2.1 Principle of FBG	9
2.2 Analysis method of FBG	10
2.2.1 Coupled mode theory	10
2.2.2 Transfer matrix method.....	13
2.3 Brief summary	15
Chapter 3 Discrete Layer-peeling Algorithm and Its Applications ...	16
3.1 Discrete Layer-peeling Algorithm	16
3.1.1 FBG inverse problem	16
3.1.2 Principle of DLP.....	17
3.2 Synthesis of multichannel FBG filter by DLP	20
3.2.1 Target reflection spectrum.....	20
3.2.2 Apodization method	21
3.3 Brief summary	23

Chapter 4 Self-adaptive Differential Evolution Algorithm.....	24
4.1 Introduction of DE	24
4.2 Standard DE.....	24
4.3 Self-adapting control parameters in DE.....	29
4.3.1 Effect of control parameters.....	29
4.3.2 Principle of jDE	29
4.4 Brief summary	32
Chapter 5 Optimal Design of Multichannel FBG Filters	33
5.1 Existing problems in design of multichannel FBG filters	33
5.2 Tailored group delay based direct design method	35
5.2.1 Basic Principle	35
5.2.2 Parameters design	37
5.3 Optimization model based on group delay parameter	41
5.3.1 Group delay parameter	41
5.3.2 Objective function and constraints	42
5.4 Simulations and discussion	45
5.4.1 Numerical simulations	45
5.4.2 Analysis of the results	52
5.5 Brief summary	54
Chapter 6 Conclusions and Future Works	55
References	57
Published and finished papers during the study period	63
Acknowledgements	64

第一章 绪论

1.1 光纤光栅的发展

以光纤通信和光纤传感技术为代表的信息技术和传感技术不断发展,极大的推动了人类社会的进步。光纤光栅作为一种新型光纤无源器件,它是利用光纤材料的光敏特性,在纤芯中形成空间相位光栅,其作用的本质是在光纤的纤芯上形成一个窄带的(透射或反射)滤波器或反射镜,从而改变或控制光在其中的传播行为和方式。光纤光栅具有体积小、低损耗、低成本、抗电磁干扰等特点,并且通过对光栅的设计,可以得到各种丰富的光谱特性,利用这一特性可构成许多性能独特的光纤无源器件。目前由光纤光栅构成的光学器件主要有光纤滤波器、光纤激光器、色散补偿器、光纤传感器等。光纤光栅在光纤通信、光纤传感、光计算和光信息处理等相关领域均有着广阔的应用前景^[1-4]。

1978年,加拿大渥太华通信研究中心的 K. O. Hill 等人在掺锗石英光纤中发现了光纤的光敏性,并且通过采用驻波写入法研制成了世界上的第一只布拉格光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG),开创了光纤光栅研究和应用的先河^[5]。1989年,美国 G. Meltz 等人发明了利用紫外光在侧面写入光敏光栅的技术^[6],这一技术有效的提高了光纤光栅的写入效率。之后, Hill 等人于 1993 年提出了相位掩模写入技术,利用近场衍射的干涉条纹在光纤中形成光栅^[7]。这种方法使得光纤光栅的批量生产成为可能,大批量、可产品化的光纤光栅开始逐渐出现,光纤光栅器件的应用逐步走向实用化。

在光纤光栅相关理论研究方面,1973年, A. Yariv 在周期性扰动介质光波导中的模式耦合问题中引入了耦合模理论,成为了对光纤光栅的特性研究的基础理论^[8]。1976年,, Kogelnik 用一阶波恩近似的方法对非周期性结构的光栅进行特性分析^[9]。1985年, Wller-Brophy 等人把多膜层理论运用到了对光纤光栅的分析上^[10]。1987年, Yamada 等人首次利用传输矩阵方法对光栅的波导特性进行研究^[11]。1997年, Erdogan 系统总结了光纤光栅的光谱分析方法,并用传输矩阵法

分析了非均匀光纤光栅^[12]。目前，光纤光栅的制作技术、理论研究和实际应用仍在不断地向前发展，它已经成为光子技术领域研究和开发的热点。

1.2 光纤光栅滤波器简介

1.2.1 光纤光栅滤波器的分类

光纤光栅的本质就是一种一个反射式的光学滤波器，它依靠对特定波长的反射，让一些光能够通过，而让另一些光不通过或者衰减。使用光纤光栅作为滤波器有以下优点：光纤光栅具有很高的反射率（最高可接近 100%），中心反射波长可控，任选窄带反射和与光纤连接简便等。光纤光栅滤波器可以灵活地窄带滤出光纤透射谱中任一波长。

从光纤的透射端来看，光纤光栅是一个带阻滤波器，而从光纤的反射端来看光纤布光栅是一个带通滤波器，即是一个波长选择器件。光纤光栅的光谱特性决定了器件性能，光纤光栅滤波器其主要类型包括^[4]：

(1) 窄带滤波器：常使用多个不同波长的光纤光栅串联，可以应用于波分复用系统，反射分离不同的波长。

(2) 宽带滤波器：它可以应用于光纤放大器的泵浦光反射镜，以提高泵浦效率和降低输出光中泵浦光对信号光的干扰。

(3) 多通道滤波器：具有多个窄带通道，它可以用于波分复用器，反射不同波长的光波。

1.2.2 光纤光栅滤波器的应用

(1) 在光通讯系统中的应用

光纤光栅滤波技术作为一项关键技术涉及到光通信系统的各个环节。光纤光栅滤波器可以作为波长选择器，可用于光源中的波长选择和光反馈。光纤光栅滤波器可以作为波分复用器，把多端口的光载波复用到同一条光纤路径进行传输。光纤光栅滤波器可以作为色散补偿器和光纤放大器，完成通道内的色散补偿和增益平坦。光纤光栅滤波器可以作为光分插复用器和光交叉连器，完成光通道交换。光纤光栅滤波器可以作为解复用器，实现对多通道的光谱的解复用。

(2) 在密集波分复用光网（DWDM）中的应用

光纤光栅滤波器作为一种传输型带通滤波器可以用于密集波分复用光网的解调系统中，由于密集波分复用光网的通道间隔很小，就要求解调系统中的滤波器具有很窄的带宽，在提取一个通道信息的时候可以准确滤去其他通道的信息。光纤光栅滤波器的窄带通特性完全符合密集波分复用光网解调系统的要求，而且光纤光栅滤波器的通道是可灵活配置的。

(3) 在光纤光栅传感网络解调中的应用

在光纤光栅传感网络的解调方法中，滤波法是非常重要的解调方法，通过配置一种与测量光栅相匹配（参数相同）的光纤光栅滤波器，用驱动元件控制匹配光栅滤波器的带通变化，让它跟踪被测量光栅的波长变化，这样就可以通过驱动元件的驱动电压或电流信号值获得波长偏移量，从而得到传感对象的测量值。

(4) 在光纤激光器设计中的应用

在光纤激光器中需要有一个选频元件。光纤光栅滤波器反射率高、线宽窄，利用光纤光栅滤波器作为选配元件可以得到很窄的激光输出，并且具有很好的单色性。同时光纤光栅滤波器的带通性能可以实现单纵模输出。而单纵模激光器在很多领域有着广泛的应用。

1.3 设计光纤光栅滤波器的研究现状

1.3.1 光纤光栅反问题的求解

设计光纤光栅问题，就是根据特定的或者预期的光纤光栅反射光谱（或透射光谱）逆向重构得到光纤光栅的关键参数，例如光栅长度、周期、折射率调制等参数。所以，对光纤光栅的设计也叫做光纤光栅的参数重构（parameters reconstruction）、反问题（inverse problem）和光栅综合问题（grating synthesis problem）^[13-15]。反问题的研究是设计和优化光纤光栅的理论基础。对于滤波器的设计，就是要根据所需要的谱线的特点，设计和调整合适的参数以满足光纤光栅的研制和应用需求。目前，求解光纤光栅反问题的算法主要可以分为两大类：传统理论方法和基于进化计算的求解。

(1) 重构光纤光栅参数的传统理论方法

典型的重构光纤光栅参数的方法主要包括傅里叶变换法^[16]、解耦合 Gel'fand Levitan Marchenko (GLM) 方程法^[17]、时频信号分析法 (time-frequency signal analysis)^[18, 19]、层析算法 (Layer-peeling algorithm)^[20-22]等。

a. 傅里叶变换法

傅里叶变换法又称为一阶玻恩近似法, 是由 Winick 和 Roman 在 1990 年提出的是一种比较简单的方法^[16]。该方法把光栅的频谱响应与光栅的耦合方程之间看成是一对傅里叶变换对, 然后利用傅立叶反变换的方法, 根据反射谱得到光栅的结构。这种方法是一种近似方法, 只适用于弱耦合光栅。因此, 它不适合于设计具有复杂折射率分布的光栅。

b. 解 GLM 方程法

Gel'fand Levitan Marchenko 方程是一个耦合积分方程, 来源于量子力学。1985 年, Song 和 Shin 首次将量子力学的方法用于解 GLM 方程^[23], 但是这种方法要求耦合系数为有理数。随后, Frangos 和 Jaggard 分别提出了两种求解 GLM 方程的数值解法^[24]。1996 年, E. Peral 等人提出利用迭代法求解 GLM 方程^[17], 这种方法有一定的改进但还是相当复杂。

c. 时频信号分析法

1998 年, Azana 等人提出了时频信号分析技术^[18]。该方法根据光纤光栅的反射系数重构的光纤光栅周期和光纤光栅长度, 得到较好的实验效果。

d. 层析算法

层析 (Layer Peeling, LP) 算法是目前应用最广泛的重构光纤光栅的重构算法。它是一种基于系统因果规律递归的重构方法, 充分考虑了电磁波传播介质层的结构和物理特性。LP 算法可以分为离散层析算法 (discrete layer-peeling algorithm, DLP) 和连续层析算法 (continuous layer-peeling algorithm, CLP)。1999 年, Ricardo Feced 首先提出了离散层析的方法并将该方法应用于光纤光栅的设计中^[20]。2000 年, L. Poladian 对连续层析方法进行了研究^[21]。2001 年, Johannes Skaar 等人对 DLP 和 CLP 分别进行了综合分析和简化^[22]。从原理上来说, 这两种方法基本是相同的, 但是它们的实现上有所不同。DLP 是基于对光栅模型自身的离散化, CLP 将耦合过程看成是连续的。在计算复杂度上, DLP

算法比 CLP 算法要简单、快速、稳定。从灵活性上, CLP 可以根据给定的频率宽度适时改变层的厚度, 灵活性较高。

(2) 进化算法重构光纤光栅参数

进化算法 (Evolutionary algorithm, EA) 是以随机搜索的方式从在解空间中搜索出使代价函数取得最优的解向量。与传统的理论方法以严格的数学推导和因果分析为基础不同, 用进化算法求解反问题的过程是不需要知道光纤光栅中的传播和散射细节, 具有高效率、简单易实现的优点。目前, 被用于光纤光栅参数重构的进化算法包括: 遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法等。

a. 遗传算法

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) ^[25-28] 是通过模拟自然界生物进化过程与机制, 求解优化问题的一类自组织、自适应概率搜索算法。它对各类复杂的优化问题具有很强的鲁棒性。遗传算法的基本思想: 根据需求解优化问题的目标函数去构造对应的适应度函数。然后, 按照一定的规则生成基因编码的初始群体, 对群体进行评价、交叉、变异、选择等操作。通过多代进化, 从而获得适应度最好的一个或几个最优个体作为问题的最优解。1998 年 Skaar 等人将遗传算法引入到对光纤光栅反问题的求解中, 并采用二元遗传算法设计制作了用于光通信的光纤光栅滤波器^[25]。

b. 模拟退火算法

模拟退火算法 (Simulated Annealing, SA) ^[29-31] 是通过模拟熔化状态下物体由逐渐冷却至最终达到结晶状态的物理过程。它通过随机地模拟物体退火过程来完成问题的求解, 也就是通过对参数的进行控制和变化, 直到所得到的参数能使能量函数达到最优值。2003 年, Dong 等人提出了用模拟退火算法来设计光纤光栅参数, 分别对均匀的光栅和切趾光栅、啁啾光栅的参数进行重构^[30]。

c. 粒子群算法

粒子群优化 (Particle Swarm Optimizer, PSO) 算法^[32-34] 是通过模拟鸟群觅食过程中的迁徙和群聚行为而提出的一种基于群体智能的全局随机搜索算法。粒子群算法和遗传算法有类似之处, 都是一种基于群体的智能优化算法。系统初始化为一组随机解, 经过迭代搜索出最优值。但是并没有遗传算法对个体进行交叉、变异、选择等进化算子操作, 而是将群体中的个体看作粒子, 粒子在解空间追随

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库